

*Посвящается Талии и Элиане*

GEORGE MUSSER

# **SPOOKY ACTION AT A DISTANCE**

The Phenomenon That Reimagines Space  
and Time — and What It Means for Black Holes,  
the Big Bang, and Theories of Everything



**Scientific American / Farrar, Straus and Giroux**

**New York**

ДЖОРДЖ МАССЕР

# НЕЛОКАЛЬНОСТЬ

Феномен, меняющий представление о пространстве  
и времени, и его значение для черных дыр,  
Большого взрыва и теорий всего

Перевод с английского



Книжные проекты  
Дмитрия Зимина



АЛЬПИНА НОН-ФИКШН

Москва  
2018

УДК 530.1  
ББК 22.313  
М32

Переводчики Вячеслав Ионов, Мария Томс  
Редактор Вячеслав Ионов  
Научный редактор Дмитрий Горбунов, доктор физ.-мат. наук

**Массер Д.**

М32 Нелокальность: Феномен, меняющий представление о пространстве и времени, и его значение для черных дыр, Большого взрыва и теорий всего / Джордж Массер ; Пер. с англ. — М.: Альпина нон-фикшн, 2018. — 360 с.

ISBN 978-5-91671-810-2

Эта книга посвящена истории феномена нелокальности в физике. Она представляет собой захватывающий обзор фактов, указывающих на то, что пространство-время является производным свойством Вселенной, а не ее фундаментальным элементом. Автор показывает, что нелокальность может быть матерью всех загадок и головоломок, с которыми сталкиваются физики в наши дни, — это не только странное поведение квантовых частиц, но и судьба черных дыр, происхождение космоса и присущее природе единство. Книга написана понятным языком без сложных математических выкладок и адресована тем, кто интересуется современными теориями, призванными объяснить сущность наиболее базовых элементов Вселенной и ее структуры.

УДК 530.1  
ББК 22.313



Книжные проекты  
Дмитрия Зими́на

Эта книга издана в рамках программы «Книжные проекты Дмитрия Зими́на» и продолжает серию «Библиотека «Династия». Дмитрий Борисович Зими́н — основатель компании «Вымпелком» (Beeline), фонда некоммерческих программ «Династия» и фонда «Московское время».

Программа «Книжные проекты Дмитрия Зими́на» объединяет три проекта, хорошо знакомые читательской аудитории: издание научно-популярных переводных книг «Библиотека «Династия», издательское направление фонда «Московское время» и премию в области русскоязычной научно-популярной литературы «Просветитель». Подробную информацию о «Книжных проектах Дмитрия Зими́на» вы найдете на сайте [ziminbookprojects.ru](http://ziminbookprojects.ru).

*Все права защищены. Никакая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, включая размещение в сети интернет и в корпоративных сетях, а также запись в память ЭВМ для частного или публичного использования, без письменного разрешения владельца авторских прав. По вопросу организации доступа к электронной библиотеке издательства обращайтесь по адресу [mylib@alpina.ru](mailto:mylib@alpina.ru).*

© George Musser, 2015

ISBN 978-5-91671-810-2 (рус.)  
ISBN 978-0-374-29851-7 (англ.)

© Издание на русском языке, перевод, оформление.  
ООО «Альпина нон-фикшн», 2018

# Оглавление

|  |     |
|--|-----|
| <i>Введение: воздушный замок Эйнштейна</i> ..... | 7   |
| 1. Многообразие видов нелокальности .....        | 21  |
| 2. Истоки нелокальности .....                    | 61  |
| 3. Локальность Эйнштейна .....                   | 107 |
| 4. Великий спор .....                            | 135 |
| 5. Нелокальность и объединение физики.....       | 175 |
| 6. Конец пространства-времени .....              | 225 |
| Заключение: амплитуэдр .....                     | 269 |
| <i>Примечания</i> .....                          | 285 |
| <i>Библиография</i> .....                        | 322 |
| <i>Благодарности</i> .....                       | 351 |
| <i>Об авторе</i> .....                           | 354 |
| <i>Предметно-именной указатель</i> .....         | 355 |



# Введение: воздушный замок Эйнштейна

Впервые я узнал о нелокальности в начале 1990-х, будучи аспирантом, причем не от своего преподавателя квантовой механики: он не посчитал нужным даже упомянуть о ней. Роясь в местном книжном магазине, я наткнулся на только что изданную книжку «Сознательная вселенная» (The Conscious Universe), которая поразила меня заявлением о том, что «ни одно предыдущее открытие не бросало больший вызов нашему восприятию повседневной реальности», чем нелокальность. Это явление походило по вкусу на запретный плод.

В обыденном английском языке *locality*\* — это немного вычурное слово для обозначения района, города или другого места. Но его первоначальное значение, появившееся в XVII в., относится к самому понятию «место». Оно означает, что у всего *есть* место. Вы всегда можете указать на предмет и сказать: «Вот он». Если этого сделать нельзя, должно быть, предмет, на самом деле не существует. Если преподаватель спросит, где ваше домашнее задание и вы ответите, что нигде, то вам придется представить оправдания.

---

\* В повседневной речи *locality* переводится как «местность», но в научном контексте используется англицизм «локальность». — Прим. пер.

Мир, в котором мы живем, наделен всеми признаками локальности. У нас сильно развито чувство места и чувство связи между местами. Мы ощущаем боль разлуки с теми, кого любим, и беспомощность от того, что находимся слишком далеко от чего-то, на что хотим повлиять. Вместе с тем квантовая механика и другие разделы физики наводят на мысль о том, что на более глубоком уровне может не быть места и расстояния. Физические эксперименты позволяют связывать судьбы двух частиц таким образом, что они ведут себя, как пара волшебных монет: сколько бы вы их ни подбрасывали, на них всегда выпадает что-то одинаковое — орел или решка. Их поведение согласовано несмотря на то, что в пространстве они не связаны никакими силами. Эти частицы могут разлететься по разным концам Вселенной и все же вести себя в унисон. Такие частицы нарушают принцип локальности. Пространство им не помеха.

Очевидно, природа нашла особое и тонкое равновесие: в большинстве случаев она подчиняется локальности, как это и *должно* быть, раз мы существуем, но все же намекает на то, что она нелокальна в своих глубинных основах. Именно данное противоречие я буду исследовать в этой книге. Для тех, кто ее изучает, нелокальность — мать всех физических загадок, причастная к широкому спектру головоломок, с которыми сталкиваются физики в наши дни: это не только странное поведение квантовых частиц, но и судьба черных дыр, происхождение космоса и присущее природе единство.

Для Альберта Эйнштейна локальность была одним из аспектов более широкого философского вопроса: почему мы, люди, вообще можем заниматься наукой? Почему мир таков, что мы можем понять его устройство? В знаменитом эссе 1936 г. Эйнштейн написал, что самое непостижимое в этом мире — это его постижимость. На первый взгляд такое утверждение само по себе кажется непостижимым. Вселенная не то что бы очень логична. Она сумасбродна и капризна, полна путаницы и произвола, несправедливости и несчастий. Многие из происходя-



щего не поддается логике (особенно если дело касается романтических отношений или вождения). И все же на фоне этих необъяснимых событий с обнадеживающей регулярностью проступают законы этого мира. Солнце встает на востоке. Предметы падают, если их уронить. После дождя появляется радуга. Люди идут в физику в уверенности, что это не просто приятные исключения из анархии жизни, а проблески лежащего в основе порядка.

Эйнштейн полагал, что физики на самом деле не имеют права ожидать этого. Мир не обязан быть упорядоченным. Он не должен подчиняться законам; при других обстоятельствах он бы мог быть совершенно беспорядочным. Когда друг Эйнштейна спросил в письме, что он имеет в виду, говоря о постижимости, тот ответил: «*A priori* следует ожидать, что мир хаотичен и не может быть понят умом каким-либо образом».

Хотя Эйнштейн и говорил, что постижимость — чудо, которое мы никогда не поймем, это не помешало ему попытаться его понять. Вся свою профессиональную жизнь он посвятил формулированию того, что же именно во Вселенной делает ее постижимой, и его размышления задали курс современной физике. Например, он понял, что внутренние механизмы природы обладают высокой степенью симметрии, т. е. выглядят одинаково, если посмотреть на мир с другой точки зрения. Симметрия приносит порядок в сбивающее с толку разнообразие частиц, открытых физиками; целые группы частиц одного вида являются, в каком-то смысле, зеркальными отражениями друг друга. Но среди свойств мира, дающих нам надежду понять его, Эйнштейн не раз возвращался к локальности как к самому важному из них.

Локальность — это тонкое понятие, которое может означать разное для разных людей. Для Эйнштейна она имела два аспекта. Первый аспект он называл «отделимостью», подразумевая, что можно отделить любые два предмета или части одного предмета друг от друга и рассматривать их по отдельности, по крайней мере в принципе. Можно взять стулья из сто-

лового гарнитура и поставить их в разных углах комнаты. Они не прекратят свое существование и не потеряют никаких качеств, таких как размер, стиль, удобство. Свойства набора в целом определяются свойствами составляющих его стульев; если на каждом стуле умещается один человек, то четыре стула позволят сесть четверым. Целое является суммой его составляющих. Второй аспект, который отметил Эйнштейн, известен как «локальное действие»: он гласит, что объекты взаимодействуют только при столкновении друг с другом или через чье-то посредство, позволяющее преодолеть пространство между ними. На расстоянии мы не можем повлиять на другого человека, для этого нужно приблизиться к нему, дотронуться, заговорить, похлопать по плечу, т. е. войти в прямой контакт или отправить кого-то или что-то для выполнения этой задачи. Современные технологии не нарушают этого принципа — они просто задействуют новых посредников. Телефон преобразует звуковые волны в электрические сигналы или радиоволны, которые распространяются по проводам или в эфире и преобразуются обратно в звуковые волны на другом конце. На каждом этапе этого пути что-то должно напрямую контактировать с чем-то еще. Если в проводе есть хотя бы крошечный разрыв, сообщение распространится так же далеко, как крик на Луне, лишенной атмосферы. Проще говоря, делимость определяет сущность объектов, а локальное воздействие — их поведение.

Эйнштейн обозначил эти принципы в своей теории относительности. Так, теория относительности гласит, что ни один материальный объект не может двигаться быстрее света. Без такого ограничения скорости объекты могли бы двигаться бесконечно быстро и расстояние потеряло бы свой смысл. Все силы природы должны преодолевать пространство, а не перепрыгивать его, как раньше считали физики. Таким образом, теория относительности дает нам меру отдаленности отдельных объектов и обеспечивает их отличимость друг от друга.

В зависимости от образа мышления теория относительности и другие законы физики воспринимаются либо как убедитель-

тельный внутренний порядок Вселенной, либо как занудный набор правил вроде тех, что насаждают авторитарные родители, пытающиеся лишить вас всех радостей в жизни. Как замечательно было бы взмахнуть руками и полететь, но, извините, это невозможно. Мы могли бы решить мировые проблемы, создавая энергию, увы, физика не позволяет и этого — нам дозволено лишь преобразовывать энергию из одного вида в другой. И вот теперь появляется локальность, еще один драконовский закон, разрушающий наши мечты о сверхсветовых космических кораблях и экстрасенсорных способностях. Локальность убивает свойственную болельщикам надежду на то, что, скрепив пальцы или проревев какой-нибудь мудрый комментарий из своего кресла, они могут поддержать свою любимую команду на поле. К сожалению, если ваша любимая команда проигрывает, а вы серьезно хотите поддержать ее, вам придется встать и добраться до стадиона.

И все же локальность нужна для нашего собственного блага. На ней держится наше самоощущение, уверенность в том, что наши мысли и чувства принадлежат нам самим. При всем уважении к Джону Донну\* каждый человек — действительно остров, сам по себе. Мы изолированы друг от друга морями пространства, и мы должны быть благодарны за это. Если бы не локальность, мир обладал бы магическими свойствами, причем не в хорошем, диснеевском смысле. Болельщикам, желающим иметь возможность влиять на игру, не выходя из дома, пришлось бы осмотрительно относиться к своим желаниям, поскольку болельщики соперников, надо думать, тоже имели бы такую возможность. Миллионы домоседов по всей стране пытались бы обеспечить своим кумирам преимущество, лишая игру смысла: она превратилась бы в противоборство воли болельщиков, а не талантов на поле. Не только спортивные состязания, но и весь мир стал бы враждебным

---

\* Джон Донн (1572–1631) — английский поэт, воспевавший нераздельность и единство влюбленных. — *Прим. ред.*

для нас. В мире без локальности внешние для нас объекты могли бы проникать внутрь тела (для этого им не нужно было бы даже преодолевать кожу), и мы потеряли бы способность контролировать свое внутреннее состояние. Мы бы слились с окружающей средой. А это, по определению, и есть смерть.



Сосредоточившись на локальности как на ключевом необходимом условии для понимания природы, Эйнштейн придал единую форму философским и научным идеям, накопленным за 2000 лет. Для древнегреческих мыслителей, таких как Аристотель и Демокрит, локальность сделала возможным рациональное объяснение. Когда объекты влияют друг на друга только при прямом контакте, можно объяснить любое событие, дав последовательное описание того, как «то ударило это, которое, в свою очередь, столкнулось с тем, а оно, в свою очередь, отскочило от чего-то еще». Каждое следствие имеет причину, связанную с ним цепью событий, которая неразрывна во времени и пространстве. Нет такого, когда остается лишь всплеснуть руками и пробормотать: «А затем происходит чудо». Греческие философы возражали не столько против чуда — они не были атеистами, — сколько против бормотания. Они считали, что даже боги должны оказывать свое влияние по ясным и объяснимым правилам. Локальность необходима не только для тех типов объяснений, которые ищут философы и ученые, но также и для методов, которыми они пользуются. Они могут отделять объекты друг от друга, постигать их по одному и шаг за шагом строить картину мира. Перед ними не стоит невыполнимая задача восприятия всего сразу.

В 1948 г., к концу своей жизни, Эйнштейн резюмировал значение локальности в коротком эссе: «Физические понятия относятся к реальному внешнему миру... к вещам, которые претендуют на “реальное существование”, независимое от наблюдателя... Эти объекты претендуют на существование, независимое друг от друга, поскольку они “находятся в разных

частях пространства». Без такого предположения о взаимно независимом существовании... пространственно удаленных предметов, предположения, которое берет начало в обыденном мышлении, физическое мышление в известном нам смысле было бы невозможным. Также невозможно представить, как можно сформулировать и проверить физические законы без такого четкого разделения».

Локальность имеет такое повсеместное значение потому, что она является самой сутью пространства. Под «пространством» я подразумеваю не только «космос», вотчину космонавтов и астероидов, но и пространство между нами и всем тем, что находится вокруг нас, пространство, которое занимает наше тело и все остальное, пространство, в котором мы замахиваемся бейсбольной битой или делаем замеры с помощью рулетки. Направляете ли вы телескоп на планеты или на окна соседей, вы смотрите через пространство. Для меня красота пейзажа заключается в головокружительном ощущении, будто охватываешь пространство, это что-то вроде чувства, возникающего, когда смотришь с большой высоты вниз, только в этом случае смотришь в горизонтальном направлении и понимаешь, что те маленькие точки на другой стороне долины действительно там находятся и что можно их потрогать, были бы руки достаточной длины.

Как давно поняли художники, пространство — это не отсутствие чего-то, а некая сущность сама по себе. То, что находится между предметами на холсте, так же важно для композиции, как и сами предметы. Для физика пространство — это холст для физической реальности. Практически все свойства наших физических сущностей являются пространственными. Мы занимаем место. У нас есть форма. Мы двигаемся. Наши тела — это замысловатый танец клеток и жидкостей в пространстве. Наши мысли — это импульсы, быстродвигающиеся вдоль траекторий в пространстве. Любое взаимодействие, которое происходит между нами и остальным миром, проходит через пространство. Живые существа — это *сущно-*

сти, а что такое сущность, если не часть Вселенной, которая получает свою неповторимую индивидуальность в силу того, что занимает определенную область пространства?

Физика берет начало из исследования того, как предметы движутся в пространстве, и пространство определяет практически все величины, с которыми физика имеет дело: расстояние, размер, форма, положение, скорость, направление. Другие свойства мира могут не казаться пространственными, но это не так: цвет, например, соответствует длине световой волны. Всего несколько свойств материи, таких как электрический заряд, не имеют известного пространственного объяснения, и даже они выдают себя, изменяя направление движения в пространстве. При взгляде на предмет все, что мы видим, в конечном счете связано с пространством, поскольку определяется взаимным расположением частиц; частицы сами по себе — всего лишь мельчайшие крупички. Функция следует из формы. Даже непространственные понятия превращаются в пространственные в умах физиков: время становится осью на графике, и законы природы действуют в абстрактных пространствах возможностей. Даже такой авторитет, как Иммануил Кант, идеи которого оказали значительное влияние на Эйнштейна, считал, что невозможно представить мир без пространства.

•

Какая ирония судьбы в том, что главный поборник локальности стал и ее ниспровергателем. Хотя больше всего он известен миру как создатель теории относительности, Нобелевскую премию Эйнштейн получил за вклад в разработку квантовой механики, теории, описывающей поведение атомов и субатомных частиц. На самом деле физики считают, что квантовая механика описывает поведение *всего*, хотя характерные для нее эффекты сильнее всего проявляются на очень малых масштабах. Теория выросла из догадки Эйнштейна и его современников о том, что атомы и частицы не могут быть просто уменьшенными версиями тех вещей, которые мы видим вокруг себя.

Если бы они были таковыми — то есть вели себя в соответствии с классическими законами физики, сформулированными Исааком Ньютоном и другими физиками, — мир бы самоуничтожился. Атомы сколлапсировали бы, частицы взорвались, а лампочки сожгли бы нас смертельным излучением. Тот факт, что мы еще живы, означает, что материя должна подчиняться какому-то новому набору законов. Эйнштейн с энтузиазмом принимал необычное: на самом деле, несмотря на (несправедливо) заработанную в дальнейшем репутацию ретрограда и защитника классической физики, он неизменно оказывался впереди всех в понимании непривычных свойств квантового мира.

Среди этих свойств была нелокальность. Квантовая механика предсказывает, что две частицы могут стать побратимами. Из-за отсутствия связывающего механизма частицы вроде бы полностью автономны, и все же воздействие на одну из них означает воздействие и на вторую, как будто бы расстояние для них ничего не значит. Научный метод «разделяй и властвуй» в их случае не работает. Частицы имеют совместные свойства, которые нельзя обнаружить, если смотреть на каждую из них по очереди, — нужно наблюдать за ними одновременно. Наш мир опутан сетью таких, казалось бы, мистических взаимосвязей. Атомы вашего тела сохраняют связь с каждым человеком, которого вы любили, — что звучит романтично, пока вы не осознаете, что связь есть и с тем странным типом, который коснулся вас мимоходом на улице.

Частицы в противоположных концах Вселенной не могут быть действительно связанными, не так ли? Эта идея показала Эйнштейну глупостью, возвратом к донаучным представлениям о магии. Любая теория, подразумевающая возможность такого «призрачного действия на расстоянии», рассуждал он, должно быть, что-то упускает из виду. Он полагал, что мир на самом деле локален и просто кажется нелокальным, и искал более глубокую теорию, которая бы обнажила скрытый механизм, позволяющий двум частицам действовать в унисон.

Эйнштейн так и не нашел такую теорию и признал, что, возможно, это он сам что-то упускает. Возможно, нет никакого скрытого механизма. Принцип локальности — а вместе с ним и наше понимание пространства — может быть ошибочным. За несколько месяцев до кончины Эйнштейн размышлял о том, что могло значить для нашего понимания мира исчезновение пространства: «Тогда *ничего* не останется от моего воздушного замка, включая теорию тяготения, как, впрочем, и от всей современной физики».

Что было действительно пугающим, так это оптимизм его современников. Для них нелокальность была пустяком. Причины их пренебрежительного отношения были трудны для понимания, они и до сих пор являются предметом спора для историков, но, пожалуй, самое мягкое объяснение этому — прагматизм. Вопросы, беспокоившие Эйнштейна, просто не казались существенными для практического применения квантовой теории. Только в 1960-х гг. до нового поколения физиков и философов наконец дошли опасения Эйнштейна. Проведенные ими эксперименты показали, что нелокальность — это не теоретический курьез, а правда жизни. Но даже тогда большинство их коллег уделяли нелокальности мало внимания — именно поэтому я практически случайно наткнулся на эту тему, будучи аспирантом.

Однако в последние 20 лет позиция физического сообщества значительно изменилась. Нелокальность захлестнула господствующие течения физики и вышла далеко за пределы феномена, открытого Эйнштейном. Как популяризатор науки и редактор я не раз разговаривал с учеными из разных сообществ, с теми, кто изучает всё — от субатомных частиц до черных дыр и крупномасштабной структуры Вселенной. И раз за разом я слышал примерно следующее: «Ну, это странно, и я бы не поверил в такое, если бы не видел этого сам, но, похоже, мир просто обязан быть нелокальным». Исследователи вели себя подобно тем самым согласованным частицам в разных концах Вселенной: зачастую не зная друг друга, они тем не менее приходили к одним и тем же выводам.



Если Эйнштейн считал, что нелокальность имеет привкус волшебства, то, может быть, новые исследования дают основания верить в паранормальные явления? Некоторые так и решились. В последние десятилетия ряд ученых предполагал, что нелокальные связи между частицами могли бы наделять вас сверхъестественными способностями. Например, если бы частицы вашего мозга находились в запутанном состоянии с частицами мозга вашего друга, то, возможно, вы могли бы общаться друг с другом с помощью телепатии. Другой крайностью было то, что связанные с нелокальностью намеки на паранормальное заставили многих ученых отвергнуть всю эту область исследований как чепуху. На самом деле никакой связи здесь нет. Ни одно из свидетельств экстрасенсорных способностей не выдержало проверки, а обсуждаемые виды нелокальных явлений имеют слишком слабо выраженные эффекты, чтобы соединять умы или дистанционно влиять на исход бейсбольных матчей.

Некоторые расстраиваются из-за этого. Напрасно. Настоящее волшебство мира состоит в том, что он *не* волшебный. По причинам, которые были изложены ранее, локальность — необходимое условие нашего существования. Любая нелокальность должна оставаться надежно спрятанной и возникать только при определенных условиях, иначе наша Вселенная была бы непригодна для жизни. Нелокальность дает нам нечто гораздо более впечатляющее, чем паранормальные явления: возможность взглянуть на истинную природу физической реальности. Если воздействия могут пересекать пространство так, словно его на самом деле нет, то из этого следует естественный вывод: *пространства на самом деле нет*. Теоретик из Колумбийского университета Брайан Грин, который занимается теорией струн, написал в своей книге 2003 г. «Ткань космоса» (*The Fabric of the Cosmos*), что нелокальные связи «показывают нам, что пространство совсем не такое, как мы думали раньше». Какое же оно тогда? Исследование нелокальности может нам подсказать. Многие физики теперь считают,

что пространство и время обречены: они являются не фундаментальными элементами физического мира, но следствием первозданного состояния отсутствия пространства. Пространство похоже на ковер с обтрепанными краями и залысинами. Подобно тому как разглядывание залысин позволяет нам увидеть основу ковра, изучение проявлений нелокальности может пролить свет на то, как пространство строится из беспространственных составляющих.

«Я всегда думал и продолжаю думать, что открытие и подтверждение нелокальности является самым поразительным открытием в физике XX в.», — говорит Тим Модлин, профессор Нью-Йоркского университета и один из ведущих философов физики в мире. В статье конца 1990-х гг. он резюмировал ее следствия: «Мир — это не просто набор отдельно существующих локализованных объектов, связанных внешне только пространством и временем. Что-то более глубокое, более таинственное связывает воедино ткань мироздания. Мы только-только достигли того момента в развитии физики, когда можно начать размышлять о том, что бы это могло быть».

В то же время именно потому, что так много стоит на кону, другие ученые говорят мне, что нелокальность не может быть правдой, что те или иные нелокальные явления наверняка окажутся ошибкой толкования и что сваливать их все в одну кучу — это неправильно. Физики достигли больших успехов, используя пространственное мышление, и не откажутся от него так просто. Один скептик, Билл Унру, преподаватель физики в Университете Британской Колумбии, думает примерно так же, как думал Эйнштейн: «Если мне нужно знать все о Вселенной, чтобы знать хоть что-нибудь, если мы воспринимаем нелокальность серьезно, если то, что происходит здесь, зависит от того, что происходит со звездами, то физика становится практически невозможной. Что делает физику возможной, так это то, что мир допускает разделение на части. Если нам действительно нужно смотреть на звезды, чтобы увидеть будущее, то я не понимаю, как можно продолжать заниматься физикой».

Помимо того что ей присуще очарование, нелокальность также является идеальным объектом для научных споров. Разногласия между такими людьми, как Модлин и Унру, исключительно интеллектуальны. Отсутствие экономических интересов не позволяет заподозрить скрытые мотивы. Здесь нет лоббистов из Exxon Mobil\*, бродящих по коридорам. Оппоненты не имеют явной личной неприязни, многие из них являются друзьями. Математика довольно проста, экспериментально полученные данные неоспоримы. И все же споры тянутся поколениями. В наши дни ученые повторяют аргументы, которые звучали еще в спорах Эйнштейна и его противников в 1920–1930-х гг. Почему так происходит? И что делать всем остальным, когда эксперты не могут прийти к согласию?

Рассмотрим наиболее известный научный спор недавнего времени: изменение климата. Большинство климатологов считают, что человеческая деятельность приводит к потеплению на планете, противники этой позиции до сих пор оспаривают это, и их доводы могут вызывать замешательство у тех, кто читает газету или бродит по сети. У большинства людей нет времени на то, чтобы стать экспертами по моделям общей циркуляции или измерениям длинноволнового излучения. Но одно мы можем понять точно: в практическом смысле спор можно разрешить независимо от того, продолжают ли эксперты спорить. В случае с изменением климата общественность уже знает все, что ей нужно. Существует немалый риск климатической катастрофы, и его снижение иначе как благоразумием не назовешь: чтобы понимать необходимость страхования от пожара, не нужно быть кандидатом наук по теории горения. Так же и с нелокальностью. Даже самые негибкие скептики теперь признают, что происходит *что-то* очень странное, что-то, заставляющее нас выходить за рамки самых глубоко укоренившихся представлений о пространстве и вре-

---

\* Exxon Mobil Corp. — американская нефтяная компания, известная, в частности, тем, что финансировала исследования, результаты которых отрицали влияние парниковых газов на изменение климата. — *Прим. пер.*

мени, что-то, требующее постижения, если мы хотим узнать, как возникла Вселенная и как физический мир образует одно совершенное целое.

Восприятие обществом — это не просто побочный вопрос для науки. Оно напрямую имеет отношение к делу, поскольку в изменчивой исследовательской среде, где идеи борются друг с другом и нет ничего абсолютно ясного, традиционные, с точки зрения сторонних наблюдателей, способы функционирования науки, т. е. использование фактов, логики, уравнений, экспериментов, недостаточны для прекращения прений. Ученым приходится полагаться на чутье, образные связи и суждения об адекватности их фундаментальных принципов, основанные на субъективной оценке. Решив исследовать нелокальность, я рассчитывал неспешно прогуляться на природе, но оказался в причудливом тропическом лесу, полном блестящих листьев, извилистых тропок и соблазнительных пристанищ, кишаших огненными муравьями. Одни ученые испытывают трепет перед бунтарской идеей поставить под вопрос одно из старейших и глубочайших понятий в науке. Другие содрогаются от подобного безумства. Если локальность нарушается, значит ли это, что наш мир в конечном счете непостижим, как опасался Эйнштейн, или смогут ли физики найти какой-то другой способ его постижения?

## Многообразие видов нелокальности

Лаборатория Энрике Гальвеза в Университете Колгейта размером примерно с гараж на пару машин и, как и большинство гаражей, забита всякой всячиной. Вдоль стен расположены столы, заставленные ящиками с инструментами, неисправными в той или иной мере электронными устройствами, а слева от входа находится самый часто используемый аппарат — кофеварка. В середине комнаты стоит пара оптических скамей: очень прочные стальные платформы размером с обеденный стол, покрытые сетью отверстий для закрепления зеркал, призм, линз и фильтров. «Как будто снова играешь в конструктор», — говорит Гальвез, веселый перуанец, который сильно напоминает Эла Франкена\*.

Если кто и взял на себя задачу показать миру, как выглядит квантовая запутанность, так это Гальвез. Запутанность — это наиболее известный тип нелокальности из тех, что наблюдались современными физиками, и именно он пугал Эйнштейна. Слово *entanglement* («запутанность») в английском языке

---

\* Алан Стюарт «Эл» Франкен — американский писатель, комик, радиоведущий и политик. — *Прим. пер.*

имеет коннотации романтической связи: особые и, возможно, мучительные взаимоотношения. Две запутанные друг с другом частицы не в прямом смысле сплетаются, как клубки пряжи, скорее между ними существует особая связь, для которой пространство не имеет значения. Вы можете наблюдать это явление, создавая, отклоняя и измеряя лучи света — не обычные лучи от фонарика, а пучки запутанных фотонов. В первых версиях этого эксперимента, проведенных в 1970-х гг. в Беркли и в Гарварде, были задействованы хитроумные изобретения «безумных ученых» вроде раскаленных печей, штабелей оконных стекол и грохочущих телетайпов. Гальвез воспользовался Blue-ray лазерами и оптоволокном для того, чтобы уменьшить размеры установки, так что теперь она умещается на школьной парте.

Большинство знакомых мне физиков-экспериментаторов в глубине души изобретатели, которых хитроумные устройства приводят в восторг не меньше, чем тайны Вселенной. Один экспериментатор из Центра квантовых технологий в Сингапуре сказал мне, что в его лаборатории студенты-новички должны пройти особый тест. В нем нет ни одного вопроса по физике. Студентам предлагают рассказать, случалось ли им разобрать какой-нибудь бытовой прибор и собрать его обратно до того, как домашние узнавали об этом. Похоже, что стиральные машины пользуются в этом смысле успехом. Что касается Гальвеза, то его детской страстью была химия: ее взрывоопасная разновидность. Он провел детство в Лиме, в районе, где жили люди среднего достатка, и однажды с друзьями попытался сделать порох. У них получилась только дымовуха, что, возможно, и к лучшему. «Получилось намного веселее, чем какие-то взрывы, — вспоминает Гальвез. — Наверное, это было не очень опасно».

По словам Гальвеза, он стал поборником нелокальности практически случайно. Как и большинство физиков, он не слишком задумывался об этом явлении до конца 1990-х гг., когда один коллега заглянул к нему в кабинет с весьма вол-

нующими новостями: австрийский физик Антон Цайлингер и его товарищи по лаборатории использовали запутанность для телепортации частиц из одного места в другое. *Телепортация?! Ни один поклонник «Звездного пути»\** не мог остаться равнодушным. Хотя группа Цайлингера телепортировала всего лишь отдельные фотоны, а не десантный отряд космических кораблей, восторг от этого события затмил все, что было связано с дымовухами. Причем методика была простой. Предположим, вы хотите телепортировать фотон из левой половины лаборатории в правую. Сначала вы подготавливаете телепорты, создавая пару запутанных фотонов и помещая один в одной половине лаборатории, а другой во второй половине. После этого вы берете фотон, который хотите перенести, и организуете его взаимодействие с левой частицей. Поскольку запутанные частицы находятся в особой связи друг с другом, это взаимодействие сразу же проявляется справа, что позволяет фотону там воссоздаться. (Некоторые придираются к словам и спорят, действительно ли можно называть этот процесс телепортацией. Они считают, что по смыслу это больше похоже на «кражу личности». Экспериментаторы лишают левую частицу ее свойств и навязывают их правой частице. Но частица — это всего лишь сумма ее свойств, так что эти два описания эквивалентны.)

У Гальвеза с коллегой уже имелось все необходимое оборудование, и вскоре они тоже перемещали частицы по своей лаборатории. «Мы пытались понять телепортацию просто ради интереса», — говорит Гальвез. Другой коллега предложил им придумать такой эксперимент с запутанностью, который могли бы повторить даже слушатели курса физики для лириков. В нем не происходит телепортации, но выполняется первый и самый важный этап этого процесса, а именно: создаются и распределяются запутанные фотоны. Хотя установка кажется теперь очень

---

\* Star Trek — популярный американский научно-фантастический телесериал, созданный Джинном Родденберри и положивший начало целой вселенной «Звездного пути». — *Прим. пер.*

простой, группа ученых билась над ней два года. Гальвез организовал летние семинары для ALPhA, ассоциации физического образования, чтобы показать преподавателям, как проводить этот эксперимент, а также опубликовал свои инструкции онлайн, чтобы любители делать все своими руками могли создавать запутанные частицы у себя в подвалах. Бывший президент ALPhA Дэвид ван Баак восклицает: «Мы давно прошли ту стадию, когда [изучение] запутанности было исключительно делом университетов. Оно становится массовым».

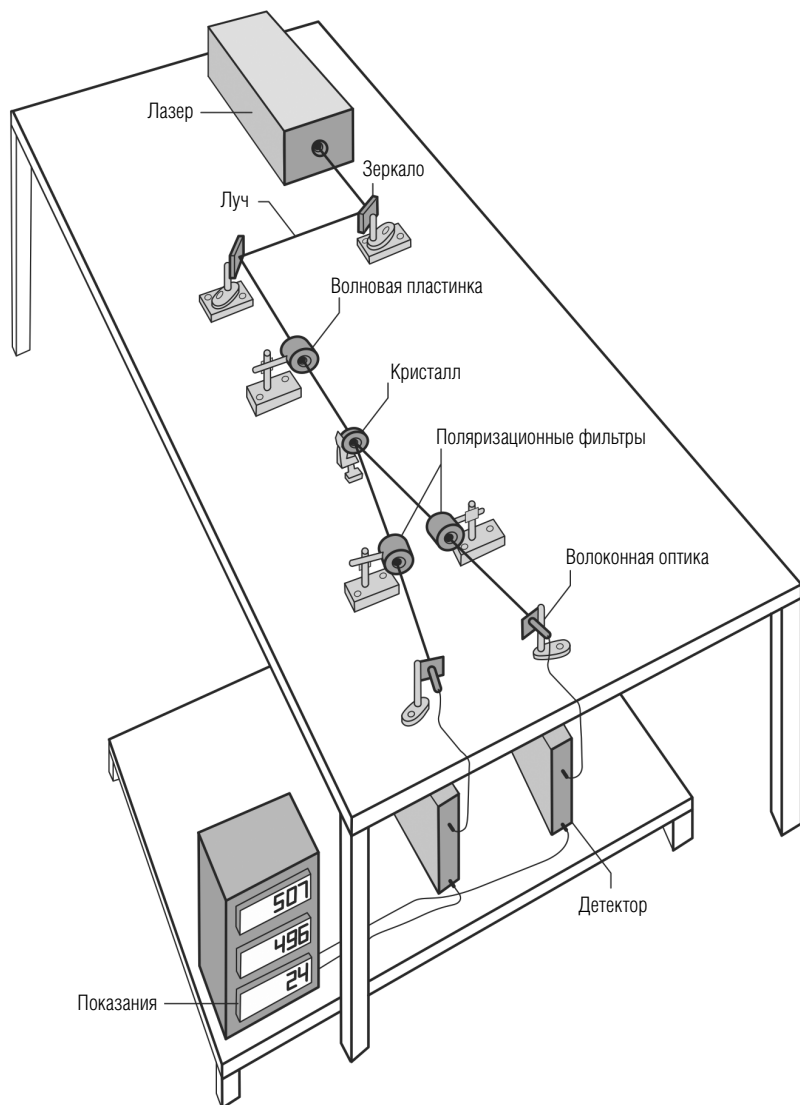
В тот день, когда я посетил лабораторию Гальвеза, одна из оптических скамей была отдана под эксперимент по изучению запутанности, цель которого заключалась не только в демонстрации запутанности, но и в исследовании возможной причины этого явления. Мне кажется, что установка по существу является высокотехнологичной машиной Руба Голдберга\* для подбрасывания монет. Они падают орлом или решкой в зависимости от того, проходят через фильтр или нет. Система настроена таким образом, что вероятность пройти его — 50 на 50, как в случае подбрасывания правильной монеты. В сущности, план такой: создать пару таких монет, подбросить их одновременно, посмотреть, какой стороной они упадут, создать еще одну пару, подбросить ее и т. д. Повторить опыт несколько тысяч раз и собрать статистику. Кажется, что мы тратим много усилий ради предсказуемого результата, пока не вспомнишь о том, что разговор идет о *квантовых монетах*. Ясно, что представление частиц в виде монет — это метафора, но если не воспринимать ее слишком буквально, то она вполне законна. Физики сами понимают явления при помощи метафор.

Чтобы привести установку в действие, Гальвез пропускает луч ультрафиолетового лазера через ряд оптических элементов, обеспечивающих должную юстировку. Этот луч попада-

---

\* Руб Голдберг — американский карикатурист, писатель и изобретатель. Известен серией карикатур, изображающих чрезвычайно сложные и громоздкие устройства для выполнения очень простых функций. — *Прим. ред.*





1.1. Экспериментальная установка для изучения квантовой запутанности (Иллюстрация Джен Кристенсен)

ет на небольшой кристалл бората бария, вещества, открытого китайскими учеными в начале 1980-х гг., который расщепляет ультрафиолетовый луч на два красных луча. Расщепление происходит на уровне отдельных частиц: если бы вы могли видеть луч как поток фотонов, то заметили бы, как некоторые ультрафиолетовые фотоны ударяются о кристалл и делятся на два идентичных красных фотона. Вот вам и монеты. Непосредственно перед кристаллом находится оптический элемент, известный как волновая пластинка, который Гальвез использует для того, чтобы контролировать выходной поток от кристалла. В зависимости от того, как он устанавливает волновую пластинку, красные фотоны получаются запутанными или нет.

Как только красные лучи расходятся, они перестают взаимодействовать. Гальвез направляет каждый луч в поляризационный фильтр, очень похожий на тот, что фотографы накручивают на объектив для подавления бликов. Фильтр пропускает или задерживает фотоны в зависимости от их ориентации, т. е. от их поляризации. Гальвез может с помощью лимба на боку фильтра контролировать, какие фотоны он будет пропускать. Для этого эксперимента оба фильтра настраиваются одинаково, так, чтобы они пропускали случайным образом половину фотонов, имитируя таким образом подбрасывание монет.

Фотоны, которые проходят через фильтры, направляются на детекторы, преобразующие их в электрические импульсы. Эти детекторы — самая дорогая и самая хрупкая часть установки. Из-за сверхвысокой чувствительности, позволяющей регистрировать одиночные фотоны, они стоят \$4000 за штуку и легко повреждаются ярким светом. Даже в комнате с выключенным освещением детекторы регистрируют фотоны в бешеном темпе, потому что даже малейший проблеск света заставляет их срабатывать. Наблюдая за ними, я начинаю понимать, насколько светлой может быть якобы темная комната. Необходимо убедиться, что телефоны и ноутбуки полностью выключены — один-единственный включенный светодиод может

испортить весь эксперимент. «Нам пришлось заклеить черной лентой все, что светилось в лаборатории, — говорит Гальвез. — Вы не представляете, сколько здесь всяких лампочек». Он накрывает приборы черной тканью и закрывает плотным пологом всю скамью.

Наконец, детекторы подключаются к счетчику с тремя цифровыми дисплеями, расположенными вне полога. Два из них показывают, какое число фотонов прошло через правый и левый поляризационные фильтры. Когда Гальвез включает лазер, эти числа мелькают как миллисекунды на секундомере. Третий дисплей показывает число «совпадений» — когда оба фотона из пары проходят каждый через свой фильтр. Продолжая метафору монет, совпадение означает, что обе монеты выпали орлом. Для Гальвеза такие совпадения являются возможностью взглянуть на квантовую нелокальность.

После небольшой экскурсии для меня Гальвез готов к проведению эксперимента. Желая убедиться, что все работает правильно, он сначала воспроизводит подбрасывание обычных монет, настраивая пластинку так, чтобы фотоны получались незапутанными. Счетчик показывает около 25 совпадений в секунду. Для сравнения: если бы каждый фотон в каждой паре проходил через фильтр, было бы 100 совпадений в секунду. Таким образом, частота совпадений равна примерно четверти максимально возможного значения. Именно этого можно ожидать, исходя из законов теории вероятностей. Если подбрасывать две монеты, каждая будет выпадать орлом в половине случаев, а обе будут выпадать орлом в четверти случаев.

Теперь Гальвез настраивает волновую пластинку так, чтобы фотоны оказывались запутанными. Частота совпадений подсакивает почти до 50 в секунду. Может показаться, что в изменении показаний счетчика в подвальной лаборатории с 25 до 50 нет ничего особенного. Но такова физика. Нужно немало усилий, чтобы приподнять завесу тайны над окружающим нас миром, и намеки на ее разгадку очень слабые, но от этого они не менее значимы. Годы ожиданий и приготовлений к этому

моменту того стоили, поскольку, глядя на эти 50, я понимаю, что именно наблюдаю, и трепещу. Фотоны ведут себя как пара волшебных монет. Гальвез подбрасывает тысячи таких пар, и обе монеты всегда выпадают одной и той же стороной: либо обе орлом, либо обе решкой. Такого не бывает по чистой случайности.

| Обычные монеты |               | Квантово запутанные монеты |               |
|----------------|---------------|----------------------------|---------------|
| Левая монета   | Правая монета | Левая монета               | Правая монета |
| Орел           | Решка         | Орел                       | Орел          |
| Решка          | Решка         | Решка                      | Решка         |
| Орел           | Орел          | Орел                       | Орел          |
| Решка          | Решка         | Решка                      | Решка         |
| Решка          | Орел          | Решка                      | Решка         |
| Решка          | Орел          | Решка                      | Решка         |
| Орел           | Решка         | Орел                       | Орел          |
| Орел           | Орел          | Орел                       | Орел          |

**1.2.** Пример результатов экспериментов с монетами. Если подбрасывать пару обычных монет, они будут выпадать одной и той же стороной в среднем примерно в половине случаев. Но если вы подбрасываете пару должным образом подготовленных квантово запутанных монет, они *всегда* будут выпадать одной и той же стороной

Если бы кто-нибудь из моих друзей показал этот фокус на вечеринке: подбрасывал бы монеты так, чтобы они одновременно выпадали орлами в два раза чаще, чем должны, я бы подумал, что это розыгрыш. Должно быть, мой друг сходил в магазин для фокусников и купил специальные монеты, одинаковые с обеих сторон, результат подбрасывания которых предопределен. Мог ли подобный трюк объяснить ту закономерность, которую я наблюдал в лаборатории Гальвеза? Чтобы исключить возможность жульничества, Гальвез использует тактику, которую предложил в 1960-е гг. ирландский ученый, изучавший физику элементарных частиц, Джон Стюарт Белл. Он поворачивает один из фильтров на  $90^\circ$ , что, так же как и подбрасывание монеты левой рукой вместо правой, не изменяет вероятность прохождения частицы через него, и если результат

действительно предопределен, ничего не должно измениться. Но это, казалось бы, безобидное изменение *влияет* на фотоны. Частота совпадений падает практически до нуля — если один фотон проходит через фильтр, то второй *нет*. Другими словами, волшебные монеты вместо того, чтобы выпадать одной стороной, теперь всегда выпадают разными сторонами. Если бы кто-то хотел вас разыграть, ему бы понадобилась особая ловкость рук, чтобы справиться с этим фокусом. Проводя дальнейшие усовершенствования, Гальвез исключает все мыслимые придирки.

Я подхожу и еще раз изучаю оптическую скамью. Между фильтрами расстояние шириной с мою руку. В экспериментах Цайлингера и других ученых оно доходит до сотен миль, а исследователи Центра квантовых технологий работают над проведением этого эксперимента в космосе, где расстояния будут еще больше. Для крошечной частицы это равносильно другому краю Вселенной. Фотоны ведут себя согласованно на таком расстоянии. Они не контактируют друг с другом, никакая известная сила не связывает их, и тем не менее они ведут себя как единое целое. Когда Гальвез поворачивает поляризационный фильтр в левой части скамьи и фотон проходит через него, этот фотон поляризуется в том же направлении, что и фильтр. Его запутанный партнер в точности следует за ним: он приобретает такую же поляризацию и соответствующим образом взаимодействует со своим фильтром. Таким образом, происходящее слева влияет на фотон справа, даже когда на преодоление этого расстояния каким-либо воздействием нет времени. Такое воздействие должно было бы мгновенно распространяться от левой части к правой, т. е. бесконечно быстро, быстрее скорости света, что явно противоречит теории относительности. Это одна из многих загадок, которые нам задает нелокальность. Физики отмечали, что все это ближе к волшебству, чем что-либо, виденное ими ранее. «Студенты обожают это, — говорит Гальвез. — Хорошие студенты говорят: “Я хочу выяснить, в чем тут дело”».

## Молчи и считай

Что такое нелокальность — всего лишь диковинка, о которой можно поохать и забыть, или же она занимает одно из центральных мест в физике? Большую часть XX в. физики относились к ней как к диковинке, и я в студенческие годы ничем не отличался от них. Лишь намного позже, когда мне в руки попала книга Тима Модлина «Квантовая нелокальность и относительность» (*Quantum Nonlocality and Relativity*), я оценил всю глубину этой тайны.

Сидя в своей гостиной, обставленной мебелью работы Джорджа Накашимы, Модлин рассказывает мне, что никогда не забудет тот момент, когда он узнал о квантовой нелокальности. Как-то осенью 1979 г. во время учебы в Йельском университете ему на глаза попался последний номер журнала *Scientific American*. Его главной темой были навозные жуки, но, полистав журнал, Модлин обнаружил статью о первых экспериментах с запутанностью. То, что частицы ведут себя как заколдованные, потрясло его. «Я помню день, когда прочитал эту статью, — говорит он. — У моих соседей по общежитию этот день тоже остался в памяти. Я ходил по комнате взад и вперед. Мир был не таким, как я думал раньше. Это выводило меня из равновесия».

Его также бесило, что преподаватели физики (как и в моем случае) даже не заикались об этом явлении. Когда он спрашивал об этом, они отмахивались от него. По воспоминаниям Модлина, он однажды поднял руку в аудитории и спросил, не может ли оказаться так, что квантовая теория не дает развиться более глубокой теории, в которой нынешние противоречия найдут объяснение. Преподаватель отмел эту идею и продолжил покрывать доску греческими буквами. «Он не предоставил никакого объяснения, почему нет, — говорит Модлин. — Просто закрыл вопрос, не отвечая на него».

•

Чтобы оценить то интеллектуальное препятствие, с которым столкнулись я и Модлин, нужно вернуться к знамени-